

Asistent ing. IANĂȘI AURORA CĂTĂLINA
**“Contribuții la studiul proprietăților mecanice și aplicațiilor unor materiale
compozite”**
(REZUMAT)

În contextul actualei crize energetice mondiale sunt necesare, în industrie, resurse materiale care să nu necesite costuri ridicate de exploatare și prelucrare și care să fie, totodată, nepoluante și biodegradabile. Astfel, este necesar să existe pe piață și să fie cât mai accesibile, materiale cu performanțe tot mai bune și cu densități cât mai mici (pentru a permite fabricarea unor piese caracterizate prin forțe mici de greutate, de frecare și de inerție), în condițiile unor costuri de producție și de exploatare acceptabile.

În acest sens, în lucrarea de față s-au pus în evidență avantajele utilizării materialelor compozite, în vederea îmbunătățirii proprietăților mecanice a elementelor structurale de rezistență ale construcțiilor, față de utilizarea materialelor clasice care necesită consumuri și costuri mult mai mari.

Teza constituie un studiu referitor la proprietățile materialelor compozite și aplicațiilor acestora la elementele de construcții supuse la eforturi cum ar fi încovoierea și forfecarea. Ea propune o prezentare sintetică a principiilor fundamentale ale analizei materialelor compozite, precum și ale proiectării și aplicațiilor acestora.

Materialele clasice, folosite în starea lor naturală, nu pot îndeplini simultan și la un nivel mulțumitor astfel de cerințe complexe, încât se recurge la realizarea unor combinații ale lor, denumite generic materiale compozite. Acestea permit optimizarea proiectării diverselor structuri tehnice, în primul rând pe baza diversității foarte mari, practic inepuizabile, de combinații care pot fi puse în practică. Mai trebuie adăugată posibilitatea (inexistentă în cazul folosirii materialelor obișnuite) de a prognoza și chiar de a "dirija" proprietățile unui compozit, prin alegerea convenabilă a naturii, formei de prezentare și a ponderii constituenților săi, sau prin aplicarea unor măsuri tehnologice adecvate.

Astfel, se prezintă principalele motive pentru care în ultimii 30 de ani se constată extinderea continuă a utilizării materialelor compozite, precum și a cercetărilor efectuate asupra lor, în lumea întreagă. Pe aceste baze au fost obținute progrese, care altădată ar fi fost de neînchipuit, în realizarea unor compozite cu performanțe cu totul deosebite și care sunt proiectate în conformitate cu particularitățile domeniului și aplicației concrete în care se dorește folosirea lor. Cercetări importante și fructuoase asupra acestei largi clase de materiale se desfășoară și în țara noastră, de peste trei decenii.

Se poate spune că lucrarea de față se înscrie în acest cadru general. Ea propune o prezentare sintetică a principiilor fundamentale ale analizei materialelor compozite, precum și ale proiectării și utilizării lor.

În acest sens, în Capitolul 1, se face un studiu al apariției și dezvoltării materialelor compozite în industrie, de la origini și până în prezent și se exprimă motivația cercetărilor efectuate în această teză.

Studiul consolidărilor cu compozite a relevat faptul că acestea se realizează prin lipirea unor materiale fibroase, impregnate cu rășini, pe suprafața diferitelor elemente, pentru a restitui sau a mări capacitatea portantă (la încovoiere, tăiere, compresiune și/sau torsiune), fără afectarea semnificativă a rigidității acestora. Fibrele folosite în aplicațiile de consolidare pot fi fibre de sticlă, aramidă sau carbon. Elementele consolidate pot fi din beton, cărămidă, lemn, oțel și piatră, iar din punct de vedere structural, grinzi, pereți, stâlpi și planșee, în ultima perioadă aplicându-se și la nodurile grindă-stâlp.

În cuprinsul capitolului 1 se face o comparație între materialele convenționale și cele compozite și se constată progreselor extraordinare pe care materialele compozite le-au făcut posibile în domeniul tehnico-ingineresc, dar și în multe alte aspecte ale activităților umane. Se face, deasemenea, o clasificare generală a materialelor compozite prezentând proprietățile acestora și domeniile de utilizare.

Datorită faptului că sunt ușor de aplicat, au greutate foarte mică și permit consolidarea elementelor la care accesul se face greu, reprezintă motivele pentru care am studiat și am folosit aceste fibre de carbon (sub formă de lamele sau pânză) la consolidarea grinzilor, de la construcțiile de lemn, cu deschideri de până la 10-15 m.

În Capitolul 2 se face o aprofundare a studiului macromecanic al materialelor compozite în sensul că se dezvoltă ideea de compozit și constituenții acestuia, respectiv materialul pentru matrice și materialul

pentru ranforsare. Se aduce în discuție aici și materialul care va fi consolidat și supus studiului ulterior, respectiv materialul lemnos.

Pe parcursul Capitolului 2 se face și o analiză selectivă a literaturii de specialitate referitoare la materiale compozite în general și la cele de tipul lemn-fibre carbon, în special. Această analiză permite evidențierea unor considerente cu caracter teoretic, tehnologic, practic și economic care sunt sintetizate în continuare. Sunt aduse la cunoștință câteva studii referitoare la materialele compozite realizate de cercetători din lumea întreagă. Ca o concluzie generală la acest capitol se poate spune că repararea elementelor deteriorate din lemn este o opțiune atractivă față de înlocuirea lor cu elemente din beton sau din oțel, care nu este rentabilă. Acest proces comportă consolidarea elementelor din lemn, supuse la eforturi, cu lamele din fibre de carbon sau cu pânză din fibre de carbon. Lamelele și pânza se solidarizează de elementul de lemn cu ajutorul unei rășini epoxidice. Rezultatul final este un material compozit, cu proprietăți superioare, care rezistă la solicitări mecanice. Folosirea de aglomerate tip Carbon-Fibre Reinforced Plastic (CFRP), care sunt deja pe larg utilizate în aplicații de înaltă performanță, a dus la reabilitarea și consolidarea unei multitudini de structuri din construcții.

În Capitolul 3 se face referire la obiectivele tezei de doctorat. Obiectivul esențial al tezei este determinarea valorii forței critice la care are loc inițierea propagării fisurii din interiorul materialului lemnos și a valorii forței maxime la care intervine ruperea epruvetei din material lemnos. În literatura de specialitate există un număr mare de lucrări care propun diverse modele/epruvete pentru determinarea analitică, numerică sau experimentală a rezistenței la rupere pentru materiale compozite ranforsate cu diverse tipuri de fibre minerale (sticlă, carbon, etc.). Puțini autori și-au îndreptat, însă, atenția spre studiul comportării la rupere în cazul solicitărilor aplicate epruvetelor din lemn. Analiza atentă a literaturii de specialitate arată că studiul problemelor de rupere se poate, totuși, face, folosind principiile de bază ale mecanicii ruperilor, caz în care fisura inițială se consideră ca un defect sau o discontinuitate de material. Datorită numărului mare de parametri și variabile care intervin în rezolvarea problemelor de rupere, s-a realizat o idealizare a modelelor reale prin definirea unor ipoteze simplificatoare pe baza intensității sau modului de influență a diferiților factori care intervin în procesul de rupere. Modelele matematice dezvoltate pe baza acestor ipoteze, în funcție de complexitate, vor fi rezolvate analitic sau numeric și verificate în final prin încercări experimentale. Scopul principal al lucrării constă în analiza ruperilor, în cazul fenomenului de încovoiere, la epruvete realizate din materiale compozite de genul lemn-fibre de carbon. Pentru atingerea obiectivului preconizat în această teză, am realizat două dispozitive cu ajutorul cărora am studiat fenomenul de rupere al grinzilor, consolidate cu fibre de carbon, datorat forțelor de încovoiere aplicate asupra acestora (fig.3.1 și fig. 3.2).



Fig. 3.5 Dispozitiv de tipul I

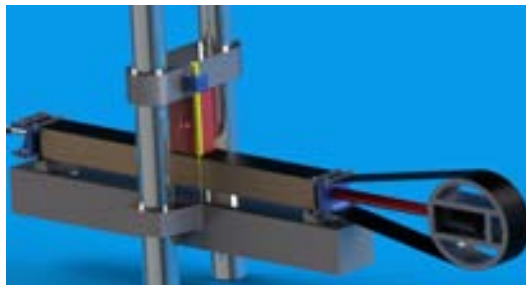


Fig. 3.6 Dispozitiv de tipul II

Alături de obiectivul principal al tezei am urmărit și realizarea unui program special pe calculator, Presa.txt, pentru determinarea experimentală a rezistenței la încovoiere statică, pentru cele patru tipuri reprezentative de epruvete. Acest lucru l-am realizat cu ajutorul aparatului de achiziții date Spider 8, conectate la dispozitivele de prindere și fixare a epruvetelor pe masa mașinii. De asemenea, utilizarea MEF (metodei cu element finit) oferă informații importante despre sarcinile și deplasările corespunzătoare primei cedări localizate a grinzilor, folosind teoria tensiunilor maxime, și compararea rezultatelor cu cele obținute în urma prelucrărilor experimentale.

Capitolul 4 face o analiză privind modul de calcul și modul de proiectare a materialelor compozite. Se urmărește determinarea relațiilor constitutive cu ajutorul cărora se pot estima caracteristicile fizico-mecanice ale unui material compozit. Pentru a se ajunge la aceste relații constitutive,

în forma lor finală, se iau în considerare trei cazuri distincte:

- A. materialul compozit are structura alcătuită dintr-o matrice în care sunt înglobate fibre dispuse paralel și este solicitat mecanic la tracțiune axială în lungul fibrelor;
- B. materialul compozit are structura alcătuită dintr-o matrice în care sunt înglobate fibre dispuse paralel și este solicitat la tracțiune axială pe o direcție perpendiculară pe direcția de dispunere a fibrelor;
- C. materialul este un agregat compozit solicitat la tracțiune monoaxială.

S-a constatat că, dacă un material compozit alcătuit dintr-o matrice (M) în care sunt înglobate fibre (f) dispuse paralel, este solicitat la tracțiune monoaxială în lungul fibrelor de o forță F_c , care produce deformarea elastică a compozitului și a materialelor sale componente, așa cum se arată în schema prezentă în figura 4.8, comportarea sa poate fi descrisă astfel: deformațiile (alungirile) specifice (de natură elastică) ale matricei ε_M , fibrelor ε_f și compozitului ε_c pe direcția de aplicare a forței F_c sunt egale: $\varepsilon_M = \varepsilon_f = \varepsilon_c$ (4.14), această condiție (numită *condiția de izodeformație*) fiind respectată datorită conlucrării componentelor M și f. Dacă E_M , E_f și E_C sunt modulele de elasticitate longitudinală ale matricei, fibrelor și compozitului, iar σ_M , σ_f și σ_c sunt tensiunile normale (pe direcția de acțiune a forței F_c) generate de solicitarea mecanică în matrice, în fibre și în compozit, se poate aplica legea lui Hooke și rezultă relațiile:

$$\varepsilon_M = \frac{\sigma_M}{E_M} \quad \varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \quad \varepsilon_C = \frac{\sigma_C}{E_C} \quad (4.15)$$

Deasemenea, tensiunile normale (pe direcția de aplicare a forței F_c) generate de solicitarea mecanică în matrice σ_M , în fibre σ_f și în compozit σ_c sunt egale: $\sigma_M = \sigma_f = \sigma_c$ (4.21), această condiție (numită *condiția de izotensiune*) fiind respectată datorită legăturilor intime existente între matrice și fibrele compozitului. Dacă se face presupunerea că efectele produse de aceste solicitări asupra epruvetelor de lemn se suprapun, fără a se influența reciproc, se poate deduce că valorile totale ale celor trei componente ale deformațiilor specifice se vor putea calcula, în funcție de componentele stării de tensiuni globale, cu următoarele relații:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \nu_{yx} \frac{\sigma_y}{E_y} + \eta_{sx} \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} \\ \varepsilon_y = -\nu_{xy} \frac{\sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} + \eta_{sy} \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} \\ \gamma_{xy} = \eta_{xs} \frac{\sigma_x}{E_x} + \eta_{ys} \frac{\sigma_y}{E_y} + \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} \end{cases} \quad (4.8)$$

Analizând cu atenție, se constată că aceste relații pot fi scrise și sub forma matricială, astfel:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & \eta_{sx} \\ \frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & \eta_{sy} \\ \eta_{xs} & \eta_{ys} & \frac{1}{G_{xy}} \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.9)$$

După cum se observă, această expresie pune în legătură parametrii unei stări plane de tensiuni cu cei ai stării plane de deformații care îi corespunde, factorul de legătură fiind o combinație a caracteristicilor de elasticitate ale materialului luat în considerare. Se ajunge, astfel, la deducerea ecuațiilor constitutive ale unui anumit material. Prin prezentarea acestor situații simple s-a evidențiat creșterea complexității răspunsului materialelor la diferite solicitări mecanice, odată cu creșterea pregnanței caracterului anizotrop al proprietăților lor. Descrierea acestui tip de răspuns se poate realiza numai prin introducerea în discuție a unor constante suplimentare de material, ceea ce face ca analizele efectuate să fie mult mai complexe decât în cazul materialelor izotrope. Ecuațiile constitutive corespund legii lui Hooke generalizate, care este studiată în cadrul noțiunilor de teoria elasticității, cu referire la materialele omogene și izotrope. Sub forma generalizată și compactă, relațiile constitutive pot fi scrise, de pildă, într-un mod similar celui de mai sus, adică având componentele notate cu $\{\varepsilon_i\}$, ale deformațiilor specifice

exprimate în funcție de cele ale tensiunilor, notate prin $\{\sigma\}_j$: $\{\varepsilon\}_i = \{S_{ij}\}\{\sigma\}_j$ (4.10). În această formă condensată de scriere, ceea ce s-a notat cu $\{S_{ij}\}$ reprezintă matricea complianțelor (flexibilităților) materialului considerat, matrice ai cărei termeni sunt exprimați, așa cum s-a observat în relația (4.9), în funcție de constantele de elasticitate ale materialului.

Pe de altă parte, aceleași relații constitutive se pot scrie și luând în considerare legătura inversă, adică având exprimate componentele stării de tensiuni în funcție de deformațiile specifice, astfel: $\{\sigma\}_i = \{C_{ij}\}\{\varepsilon\}_j$ (4.11), unde $\{C_{ij}\}$ se numește matricea rigidităților materialului.

Ca o concluzie a Capitolului 4, analizând expresiile (4.9)-(4.11) rezultă că matricile $\{S_{ij}\}$ și $\{C_{ij}\}$ conțin coeficienții parametrilor stării de tensiuni, respectiv de deformații pentru care se scriu relațiile constitutive. Prin urmare, ele trebuie să fie matrici pătrate, de ordin egal cu al matricilor coloana $\{\varepsilon\}_i$, și $\{\sigma\}_j$. Deasemenea, cele mai ridicate grade de anizotropie se înregistrează pentru compozitele armate cu fibre continue lungi, mai ales dacă armarea este unidirecțională. În plus, este clar că deosebirile cele mai pronunțate se vor constata între valorile caracteristicilor de pe direcțiile longitudinală, respectiv transversală.

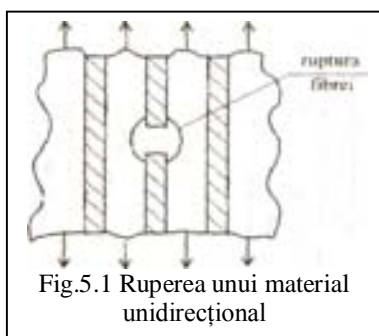


Fig.5.1 Ruperea unui material unidirecțional

Capitolul 5 tratează fenomenele de degradare și rupere ce apar la materialele compozite. Mecanismele ruperii compozitelor înglobează toate procesele mecanice care generează apariția fisurilor la nivel microscopic și macroscopic. Acest fenomen cuprinde două faze: inițierea fisurii și propagarea fisurii. Inițierea fisurii reprezintă crearea de microfisuri la nivel microscopic, iar propagarea fisurii este rezultatul generării de suprafețe macroscopice de rupură, ce au punct de plecare microfisurile microscopice. Rupura unui compozit unidirecțional este rezultatul acumulării diverselor mecanisme elementare: rupura fibrelor ranforsante, rupura transversală sau longitudinală a matricii, rupura interfeței fibră-matrice. Într-un

material unidirecțional solicitat mecanic, ruperea fibrelor apare când tensiunea normală într-o fibră depășește tensiunea de rupere. Ruperea fibrei (fig.5.1) generează apariția unui concentrator de tensiune în vecinătatea zonei de rupere.

Experiența a demonstrat că rezistența la rupere a compozitelor de înaltă performanță este determinată de proprietățile de rezistență ale fibrelor, iar în cazul compozitelor industriale cu fibre de sticlă performanțele de rupere sunt limitate de rigiditatea prea ridicată a matricii. Rezultatele practice au dovedit că tensiunea medie maximă este un parametru esențial față de care se poate face evaluarea rezistenței la rupere a unui compozit. Se preferă lucrul cu valoarea medie deoarece nu toate fibrele au aceeași rezistență la rupere, unele dintre ele cedează iar efortul este preluat de cele intacte. Este necesar deci, să se adapteze proprietățile matricii cu cele ale fibrelor. După inițierea rupturii într-un compozit, propagarea acesteia diferă în funcție de natura interfeței fibră-matrice.

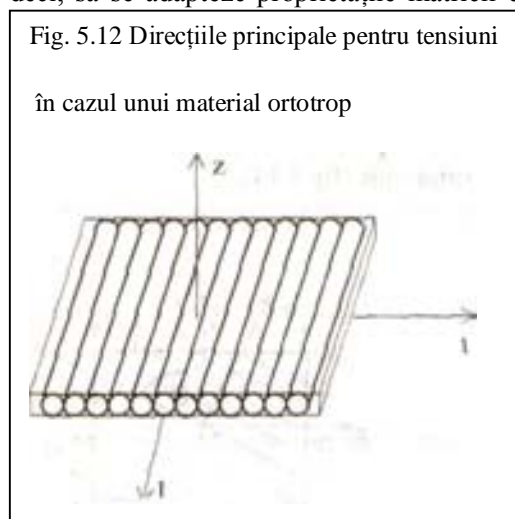


Fig. 5.12 Direcțiile principale pentru tensiuni în cazul unui material ortotrop

Pe parcursul acestui capitol se face și un studiu al teoriilor de rupere a compozitelor. Așa cum s-a arătat în cazul solicitărilor simple ale materialelor compozite, la fel ca la cele omogene și izotrope, se pot determina tensiunile la care are loc ruperea materialului. Apare deosebirea că tensiunea de rupere depinde de direcția de solicitare și aceasta într-un domeniu foarte larg de valori.

În cazul solicitărilor complexe, când tensorul tensiunilor are mai multe componente diferite de zero, este necesar să se folosească criterii de rupere care țin seama atât de mărimea fiecărei tensiuni în parte cât și de efectul lor corelat. Necesitatea introducerii acestor criterii de rezistență, rezultă datorită următoarelor remarci:

a) pentru un material ortotrop direcțiile principale pentru tensiuni nu coincid, în general, cu direcțiile de ortotropie, ca la materialele izotrope;

b) o încercare uniaxială nu este suficientă pentru determinarea tuturor termenilor din ecuația constitutivă, deoarece comportamentul (deci și constantele elastice), se schimbă cu direcția de solicitare;

c) pentru compozitele fibră – rășină, limita elastică corespunde limitei de rupere, dar rezistența de rupere este diferită în funcție de sensul de solicitare (sensul lung - l sau transversal -t) și de tipul de solicitare (tracțiune - compresiune).

Criteriile de care se ține seama atunci când se analizează degradarea și ruperea unui compozit sunt următoarele:

- Criteriul tensiunii maxime care impune ca tensiunile să se încadreze într-un domeniu de valori: $(\sigma_{ij}^-)_r \leq \sigma_{ij} \leq (\sigma_{ij}^+)_r$, (5.1), unde: $(\sigma_{ij}^-)_r$ și $(\sigma_{ij}^+)_r$ sunt tensiunile de rupere la o solicitare σ_{ij} negativă, respectiv pozitivă. Acest criteriu are dezavantajul că, din punct de vedere al ruperii, presupune independența între componentele tensorului tensiunilor. De aceea acest criteriu supraapreciază calitățile de rezistență ale materialelor, ceea ce este un inconvenient pentru dimensionare.

- Criteriul deformațiilor maxime care, din punct de vedere formal, este dentic cu cel al tensiunilor maxime, însă se referă la deformații. Expresia matematică a criteriului deformațiilor maxime este:

$$(\varepsilon_{ij}^-)_r \leq \varepsilon_{ij} \leq (\varepsilon_{ij}^+)_r \quad (5.5)$$

Cele două criterii prezintă diferențe deoarece direcțiile principale de tensiune nu coincid cu direcțiile principale de deformație.

- Criteriul TSAI-WU care propune o formă polinomială pentru studiul fenomenului de rupere și care, în practică, păstrează numai termenii de ordinul întâi și doi. De exemplu, în cazul stării plane de tensiune, criteriul Tsai-Wung capătă forma:

$$F_{11}(\sigma_{11})^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{22}(\sigma_{22})^2 + F_{66}(\sigma_6)^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 = 1 \quad (5.7)$$

- Criteriul Hill reprezintă un caz particular al criteriului Tsai-Wung și are expresia matematică:

$$\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad (5.13)$$

Datorită simetriei tensorului tensiunilor, rezultă egalitatea: $F_{ij} = F_{ji}$. Acest criteriu este folosit îndeosebi pentru stări plane de tensiune pentru care capătă forma:

$$-2F_{12}\sigma_1^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 - (F_{12} + F_{23})\sigma_1^2 + F_{66}\sigma_6^2 = 1 \quad (5.15)$$

S-a constatat experimental că acest criteriu apreciază mai bine decât criteriul tensiunii maxime starea de tensiuni la care se produce ruperea.

Concluzia care se desprinde la finalul Capitolului 5 este că, din cele patru criterii folosite la studiul ruperii compozitelor, criteriul de rupere Tsai-Wu este relativ ușor de utilizat, precum și de adaptat calculului automatizat. În plus, este avantajos deoarece conduce la predicții corecte privind rezistența la solicitări biaxiale a materialelor analizate. Este remarcabil că, prin intermediul termenilor liniari din expresia matematică a criteriului, se ține seama de diferențele între rezistențele la tracțiune și la compresiune ale materialului, ceea ce se realizează prin puține dintre teoriile de rezistență.

Capitolul 6 al tezei conține proiectarea și calculul consolidărilor cu compozite. Consolidările cu compozite sunt tehnici eficiente, care pot fi aplicate la o scară mare de structuri constituite din diferite materiale. În prezentul capitol sunt abordate câteva aspecte legate de consolidarea elementelor de beton armat. S-au luat în considerare câteva solicitări de bază: încovoierea, tăierea și compresiunea axială. Calculele au fost conduse după două normative de calcul internaționale aflate în vigoare, normative pe care le-am considerat că sunt reprezentative: Raportul 14 al fib TG 9.3 "Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures" (2001) și Raportul ACI 440.2R-02 "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures" (2002).

Recomandările de calcul pe care le face normativul de calcul fib TG 9.3 țin cont de verificarea în starea limită ultimă (S.L.U.) a compozitului. Această verificare poate fi idealizată cu ajutorul unui răspuns liniar, definit astfel:

$$\sigma_f = E_{fu} \varepsilon_f \leq f_{fd}, \quad E_{fu} = f_{fk} / \varepsilon_{fuk} \quad (6.1)$$

unde: E_{fu} este modulul de elasticitate bazat pe valorile caracteristice ale rezistenței la întindere și ale deformației specifice ultime ale compozitului. Dacă în calculele conduse în starea limită ultimă (S.L.U.) modul de cedare este prin zdrobirea betonului comprimat sau prin dezlipirea compozitului, atunci se limitează deformația specifică maximă ce poate apărea în compozit. Criteriul permite verificarea la încovoiere a structurii de tipul beton-compozit. Această verificare se face în trei stări: în situația inițială, în starea limită ultimă (S.L.U) și în starea limită a exploatării normale (S.L.E.N). Calculul se face considerând o comportare linear-elastică a elementelor și materialelor. Deasemenea, se ține cont de efectul încărcării inițiale înaintea consolidării care trebuie luat în considerare în calculul elementului de consolidat. Pe baza teoriei elasticității și având momentul de serviciu inițial M_0 ce acționează asupra elementului în timpul consolidării, se poate evalua distribuția deformațiilor specifice din element. Deoarece, de regulă, M_0 este mai mare decât momentul de fisurare M_{cr} , calculele se bazează pe o secțiune fisurată. Dacă M_0 este mai mic decât M_{cr} , influența sa în calculul elementului de consolidat poate fi neglijată. Modurile de cedare ale acestor tipuri de consolidări se clasifică în funcție de contribuția compozitului astfel: materialul compozit acționează la întreaga lui capacitate; pierderea contribuției compozitului; o desprindere (peeling-off); o cedare la forța tăietoare a betonului de la capătul compozitului.

Recomandările de calcul ale normativului ACI 440.2R-02 țin cont încă de la început de factorul de reducere a caracteristicilor compozitului. Se face calculul în două stări limită ale structurii beton-compozit și anume: calculul în Starea Limită Ultimă (S.L.U.) și calculul în Starea Limită a Exploatării Normale (S.L.E.N.). Astfel se pun condiții de limitare a eforturilor ce pot apare în armătura de oțel la starea de exploatare normală.

Ca și concluzie a acestui capitol, trebuie menționat că, deoarece proiectul de execuție al unei construcții combină și implică diverse aspecte de structuri și sunt disponibile diferite sisteme de consolidare, proiectantul trebuie să aibă experiență în proiectarea consolidărilor structurale. Proiectarea consolidărilor necesită și cunoștințe despre materiale, sisteme, comportarea structurii și aspectele de siguranță sau risc. Pe lângă faptul că s-au luat în considerare solicitările de bază, încovoierea, tăierea și compresiunea axială, în calcule trebuie să se țină cont și de problemele cu adeziunea compozitului la structura din beton. Acestea pot apărea doar dacă armătura de pe fața supusă la întindere curge sau dacă se dezvoltă forțe tăietoare mari. Dacă condițiile impuse de normativele în vigoare sunt îndeplinite, fisurile din încovoiere vor produce doar microfisuri la interfața dintre compozit și beton, precum și desprinderi locale ale compozitului, care însă nu vor conduce la cedarea prin dezlipirea compozitului. Astfel, utilizarea celor două normative ajută la dimensionarea și verificarea elementelor de construcții, oferind un calcul acoperitor pentru proiectarea oricărei construcții din beton armat.

Capitolul 7 conține metodele de aplicare a consolidărilor cu materiale compozite cât și mijloacele experimentale cu ajutorul cărora se studiază aceste consolidări. Se trasează obiectivele principale care sunt urmărite prin cercetările experimentale. Se găsesc soluții de îmbinare a epruvetelor cu materialele din fibră de carbon astfel ca portanța grinzii să fie cât mai ridicată și să se realizeze cu costuri cât mai mici. Din acest punct de vedere, se aduc în discuție schemele de lucru ale celor două dispozitive care ajută la efectuarea cercetărilor experimentale și se prezintă modelele de epruvete ranforsate cu materiale compozite, care vor fi cercetate pe parcursul tezei.

Capitolul 8 cuprinde studiile experimentale realizate pentru determinarea rezistenței mecanice a lemnului consolidat cu materiale compozite sub formă de lamele din fibre de carbon. Astfel că, una din ideile urmărite în teză a fost cea referitoare la obținerea unor structuri consolidate, cu preț scăzut pe bază de materiale ieftine, ușor de prelucrat. În acest sens, s-a căutat găsirea unei combinații între un material cât mai ieftin (lemnul) care să fie ranforsat cu elementele compozite existente pe piață, rezistența elementului mecanic astfel realizat urmând să fie cât mai mare.

Materialul de construcție tradițional, lemnul, a devenit în mod normal obiectivul atenției studiului. De asemenea, s-a constatat că subsansamblul de construcție de mare importanță și puternic solicitat este grinda. Solicitarea predominantă a unei grinzi este încovoierea, tensiunile normale datorate elementelor fiind hotărâtoare în asigurarea portanței acesteia. În consecință s-a apelat la soluția clasică de adăugare de elemente din material de calitate în zonele intens solicitate astfel ca portanța grinzii să crească corespunzător.

Soluția constructivă foarte simplă permite evidențierea cantitativă a îmbunătățirii portanței,

costurile și efortul experimentului fiind reduse (fig 8.1). Singura dificultate practică ce trebuie depășită este găsirea soluției și mijloacele concrete de solidarizare a materialului de slabă rezistență (lemnul) de lamelele de compozit atașate la grindă; de modalitatea de solidarizare depinde gradul de creștere a capacității portante, deci de utilizare a rezistenței materialului adăugat. Trebuie evidențiat că cele două părți ale grinzii nou rezultate (lemn și compozit) trebuie să se deformeze împreună, la suprafața de contact producându-se forțe de alunecare longitudinală destul de mari; dacă materialul compozit va suporta foarte bine solicitările la forfecare longitudinală, lemnul are rezistență foarte mică la tensiuni tangențiale paralele cu fibrele, fapt ce limitează drastic încărcarea grinzii. Acest fenomen (cedarea în secțiune longitudinală de contact lemn - compozit) limitează profitul ce ar rezulta din rezistența și rigiditatea foarte mare a

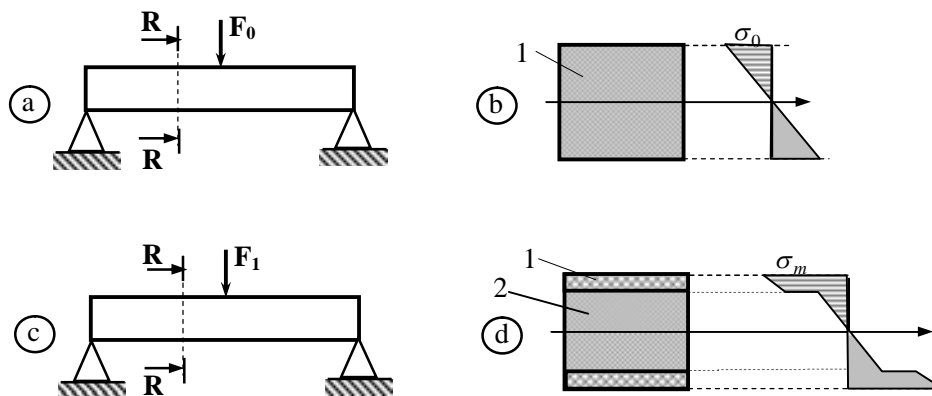


Fig. 7.1. Schema de solicitare a unei grinzi

a - grindă din material cu rezistență mică; b - solicitarea grinzii din material cu rezistență mică; c - grindă ranforsată din material cu rezistență mare d - solicitarea secțiunii grinzii ranforsate;
1 - lemn, 2 - compozit.

materialului compozit.

Parametrul cel mai concludent și sintetic ce permite evaluarea portanței elementului experimental (grinda) este tensiunea mecanică normală σ ce se produce în secțiunea transversală. Zona de interes este cea de contact lemn - compozit aflată în interiorul grinzii dar, momentan, nu există soluție de măsurare a

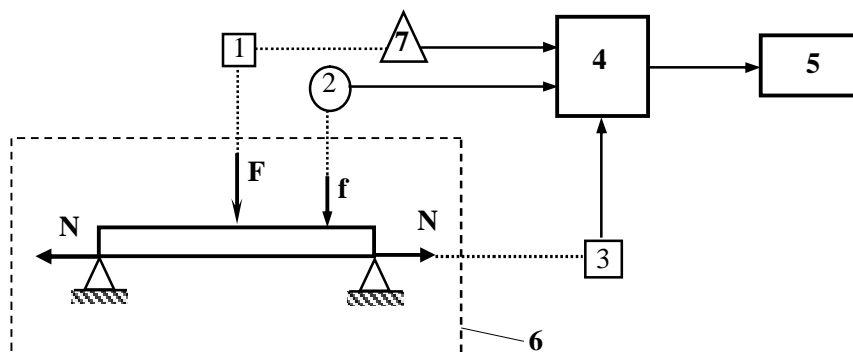


Fig. 7.4. Schema sistemului experimental

tensiunilor în interiorul corpurilor solicitate mecanic. Metodele actuale de măsurare a tensiunilor mecanice se bazează pe evaluarea deformațiilor materialului la suprafața elementului studiat și deci total inadecvate cazului nostru. De aceea s-a renunțat la măsurarea tensiunilor și s-a apelat la urmărirea săgeții (deformației) grinzii notată cu f .

Concluzionând asupra schemei experimentale se poate da structura din fig. 8.4: modulul fizic experimental 6 este compus dintr-o mașină de încercat materiale care permite aplicarea controlată a

solicitărilor. Cele două forțe se măsoară cu traductorul 1, aparținând mașinii de încercat și un dinamometru de 5 kN (notat pe schemă cu 3); săgeata f se măsoară cu un traductor de deplasare 2. Pentru a se putea înregistra forța mașinii de încercat s-a conceput și realizat un adaptor 7 care transmite un semnal etalonat către sistemul de achiziție 4. Sistemul de achiziție a datelor de probă este comandat de calculatorul 5 (care joacă rol și de înregistrator).

Mașina universală de încercat materiale, utilizată pentru solicitarea grinzii este dată în imaginea din fig. 8.5. Epruvetele de încercat au fost folosite în două variante: așezate direct pe suportul cu role al mașinii (specializat pentru încercarea la încovoiere) sau prinse într-un dispozitiv de tensionare axială a lamelei de material compozit. Dispozitivul de tensionare este prezentat schematic în fig. 8.7. În esență, funcționarea soluției de tensionare se bazează pe lamelele de compozit 2 care sunt fixate în suportii 1; pe unul din suporti este fixată o piuliță care permite tensionarea axială a grinzii 3, forța de tensionare fiind măsurată cu traductorul 4. Realizarea tehnică a dispozitivului de tensionare este dată în imaginile din fig. 8.8.

Procedura de încercare are următoarele faze:

- calibrarea sistemului de măsură,
- poziționarea grinzii de încercat pe mașină,
- încărcarea mecanică a grinzii,
- urmărirea și înregistrarea parametrilor,
- notarea detaliilor de încercare (comportarea materialului, anomalii, etc).



Fig. 7.5 Mașina universală pentru încercări mecanice a materialului (tip AMSLER)

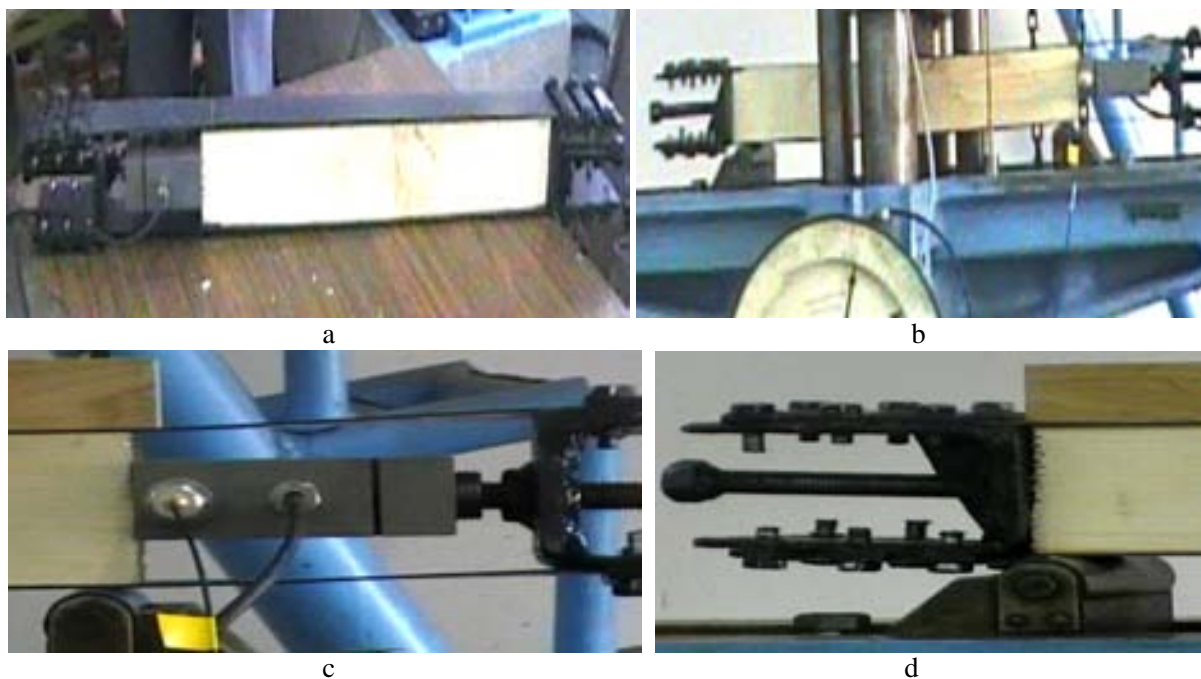


Fig. 7.8 Dispozitiv de tensionare

a-vedere, b-dispozitiv pe mașina de încercat, c-detaliu dreapta, d-detaliu stânga

Cazurile pe care s-au executat experimentările sunt:

Cazul 1: grindă întărită cu material compozit

- cazul **1.a**: lemn de rășinoase, cu întăritură tensionată din lamele compozite tip Megaplate,
- cazul **1.b**: lemn de fag, cu întăritură tensionată din lamele compozite tip Megaplate,
- cazul **1.c**: grindă de metal (laminat tip INP 100) cu întăritură netensionată din lamele compozite tip Megaplate.

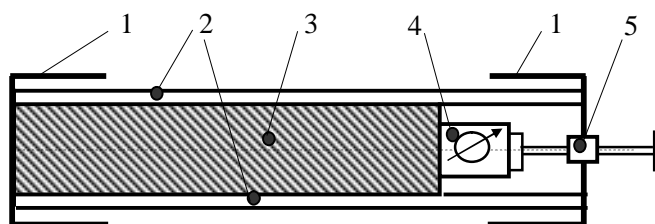


Fig. 7.7. Dispozitiv de tensionare axială.
1,2- suportți axiali, 2-material compozit, 3-grindă de lemn, 4-traductor de forță, 5-sistem șurub-piuluță de tensionare axială

În **Cazul 1.a** am supus la încercări grinda de rășinoase, întărită sus-jos cu lamele de material compozit de mare rezistență. Lamelele de compozit sunt tensionate axial în dispozitivul cu șurub iar grinda este rezemată la capete și acționată transversal până la rupere, înregistrându-se forța transversală, forța axială (de tensionare), săgeata maximă.

Echipamentele de lucru și aparatura de măsură utilizate în acest caz sunt următoarele: mașina universală pentru încercări mecanice, sistem de achiziție Spider 8, rezoluție 12 biti, traductor inductiv de cursă liniară WA300, traductor de forță, S9 50kN, condiționar de semnal NEXUS 2692-A-014, accelerometrul piezoelectric tip 4391, Notebook IBM ThinkPad R51. Parametrii care s-au înregistrat în urma încercărilor la încovoiere sunt:



Fig. 8.20.1 Configurația experimentală în Cazul 1.a.

F (kN) – Forța de compresiune a presei hidraulice, F_t (kN) – Forța transversală de compresiune, Crs (mm) – Cursa liniară a pistonului presei (egală cu săgeata grinzii încercate), Acc (m/s^2) – Accelerația de vibrație a grinzii (sesizor de rupere).

Pentru fiecare încercare a fost parcursă următoarea secvență de operații:

- Definitivarea montajului experimental;
- Reglarea unei forțe inițiale de pretensionare transversală;
- Setarea caracteristicilor încercării și lansarea achiziției de date;
- Creșterea progresivă a forței de apăsare, cu menținerea manuală a forței de compresiune transversală la o valoare ridicată;
- Descărcarea forței de apăsare;
- Oprirea sistemului de achiziție date și salvarea datelor în fișier de date.



a



b



c

d

Fig. 8.21.1 Grinda de referință a cazului 1.a

a-imaginea încercării grinzii de referință, b-ruperea parțială a grinzii de referință, c-ruperea finală a grinzii de referință, d-detaliu de rupere a grinzii întărite cu material compozit tensionat

Pentru prelucrarea datelor experimentale a fost utilizat programul „Presa.tst”. A fost realizată vizualizarea datelor experimentale și cu ajutorul cursorului Mark1 au fost selectate momente de timp separate la interval de 5...10 s, în condiții de stabilitate pentru forța de acționare și pentru forța transversală de pretensionare. Pentru fiecare moment a fost calculată valoarea medie a parametrilor înregistrați, pe o secvență de 40 eșantioane centrate pe cursor. S-a utilizat o grafică cu două cursoare, cu posibilitatea citirii valorilor instantanee în display-uri poziționate în partea interioară și cu denumiri sugestive, asociate prin culoare la cursor și trasă. Săgeata maximă, identică cu deplasarea cadrului mașinii, notată **Crs** (mm), are culoarea neagră și este raportată la ordonata din partea stângă. Forța dezvoltată de presă, notată **F** (kN), are culoarea roșie și este raportată la ordonata din partea dreaptă. Valorile medii calculate pe un număr de 40 eșantioane centrate pe cursorul Mark1 sunt transmise în display-urile din partea dreaptă și sunt stocate în fișierul de date prin tastarea selectorului Selector1. Datele achiziționate au fost prezentate sub formă de tabele. O interpretare concludentă a rezultatelor experimentale s-a obținut prin compararea rezultatelor de la grinda întărită cu cele de la grinda de referință (grinda fără compozit). În fig. 8.21.1.a este arătată grinda de referință; modul de rupere, atunci când nu a existat întărirea cu material compozit, este arătat în fig. 8.21.1.b și c; modul de rupere, atunci când grinda este întărită, este arătat în imaginea din fig. 8.21.1.d.

Graficele dependențelor funcționale ale mărimilor măsurate sunt reprezentate în Excel. Din analiza accelerației de vibrație se pot observa momentele de cedare a primelor fibre ale grinzii de lemn, având ca rezultat micșorarea progresivă a forței de pretensionare. Această micșorare a necesitat intervenția manuală, prin intermediul șurub-piuliță, pentru a crește forța de pretensionare, având ca rezultat variațiile prezente în grafice. Un exemplu de grafic este în fig. 8.23 unde apar toate dependențele forțelor ce acționează asupra grinzii funcție de săgeata corespunzătoare solicitării.

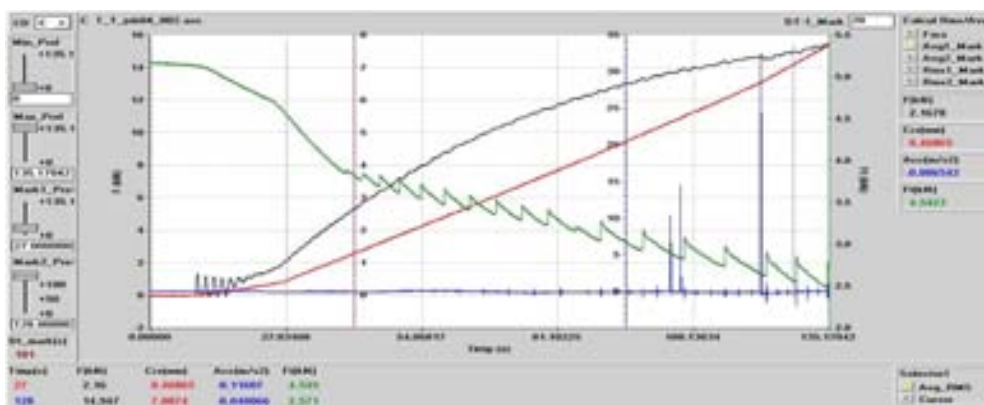


Fig. 8.23 Caracteristici determinate pentru forță de pretensionare $F_t = 5$ kN

În **Cazul 1b** am supus la încercări grinda de fag, întărită sus-jos cu lamele de material compozit de mare rezistență; lamelele de compozit sunt tensionate axial în dispozitivul modificat, șurubul de tensionare fiind înlocuit cu un dispozitiv hidraulic specializat (conform fig.8.31.a); grinda este rezemată la

capete și acționată transversal până la rupere, înregistrându-se forța transversală și săgeata maximă (nu se mai măsoară forța axială de tensionare).

În **Cazul 1c** am încercat grindă din laminat de oțel tip I (laminat tip INP100), întărită jos cu lamelă de material compozit de mare rezistență; lamela de compozit este fixată de talpa inferioară cu eclise și șuruburi (conform detaliului din fig. 8.31.b).

Echipamentele de lucru și aparatura de măsură utilizate în cele două cazuri sunt similare cazului 1.a și anume: mașina universală pentru încercări mecanice, sistem de achiziție Spider 8, rezoluție 12 biti, traductor inductiv de cursă liniară WA300, traductor de forță, S9 50kN, Notebook IBM ThinkPad R51.

Parametrii care s-au înregistrat în urma încercărilor de încovoiere la care s-au supus grinzile de lemn și de metal sunt următorii: F (kN) – Forța presei hidraulice, Crs (mm) – Cursa liniară a cadrului mașinii, egală cu săgeata maximă a grinzii.

În fig. 8.31 este prezentat montajul experimental pentru grinda de lemn întărită și detaliul dispozitivului specializat de tensionare. În fig. 8.32 este prezentat montajul experimental pentru grinda metalică INP 100, iar în fig. 8.33 este prezentat montajul experimental pentru grinda de lemn neîntărită.

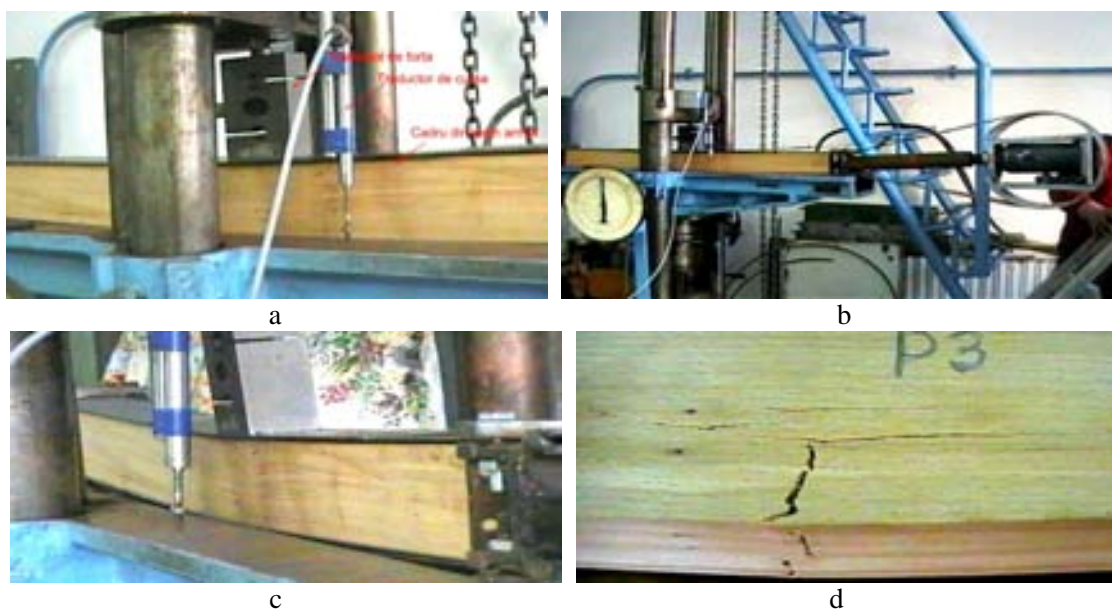


Fig. 8.31 Montajul experimental pentru CAZUL 1.b

a-grindă întărită cu material compozit pretensionat, b-dispozitiv specializat de pretensionare
c-grindă întărită, solicitată și deformată, d-detaliu de rupere în grindă.



Fig. 8.32 Montajul experimental pentru CAZUL 1.c

a-grindă de oțel, solicitată transversal, b-detaliu montaj cazul 1.c

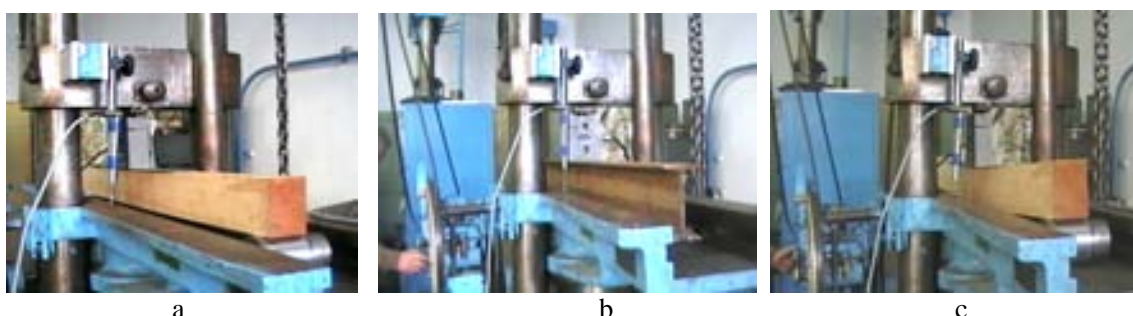


Fig. 8.33 Montajul experimental pentru grindile de referință (CAZUL 1.b și 1.c)

a- grindă de lemn (de referință pentru Cazul 1.b), b- grindă de oțel (de referință pentru Cazul 1.c), c- grindă de lemn (de referință pentru Cazul 1.b), solicitată și deformată.

Pentru fiecare încercare a fost parcursă următoarea secvență de operații:

- Definitivarea montajului experimental;
- Setarea caracteristicilor încercării și lansarea achiziției de date;
- Creștere progresivă a forței de încărcare transversală;
- Descărcarea forței;
- Oprirea sistemului de achiziție date și salvarea datelor în fișier de date.

Pentru prelucrarea datelor experimentale am utilizat același program „Presa.tst” ca și în cazurile 1.a și 1.b de mai sus. A fost realizată vizualizarea datelor experimentale iar cu ajutorul cursorului Mark1 au fost selectate momente de timp separate la interval de 5...10 s, în condiții de stabilitate pentru forța de acționare. Pentru fiecare moment a fost calculată valoarea medie a parametrilor înregistrați, pe o secvență de 40 eșantioane centrate pe cursor. S-a utilizat aceeași grafică cu două cursoare, cu posibilitatea citirii valorilor instantanee în display-uri poziționate în partea interioară și cu denumiri sugestive, asociate prin culoare la cursor și trasă. Săgeata maximă, identică cu deplasarea cadrului mașinii, notată **Crs** (mm), are culoarea neagră și este raportată la ordonata din partea stângă. Forța dezvoltată de presă, notată **F** (kN), are culoarea roșie și este raportată la ordonata din partea dreaptă. Valorile medii calculate pe un număr de 40 eșantioane centrate pe cursorul Mark1 sunt transmise în display-urile din partea dreaptă și sunt stocate în fișierul de date prin tastarea selectorului Selector1. Datele achiziționate au fost prezentate în tabele. În figura 8.34 b este reprezentată variația în timp a forței de solicitare funcție de săgeată. În figura 8.34 a avem variația în timp a forței de încărcare funcție de săgeată.

Din analiza caracteristicilor reprezentate în coordonate polare se poate observa, deci, fenomenul de histerezis care rezultă pe un ciclu de încărcare-descărcare a cadrului. Aria cuprinsă în bucla de histerezis este o măsură a energiei disipate în grinda solicitată.

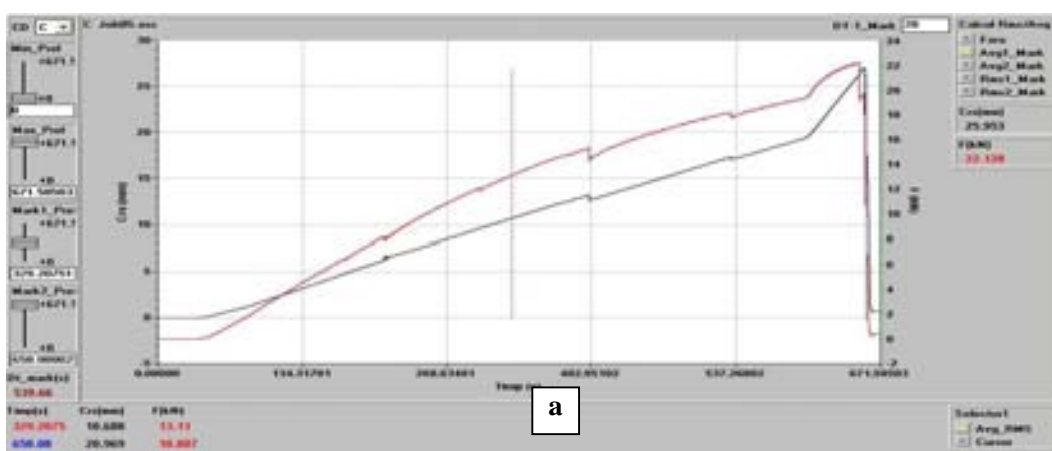


Fig. 8.34a. Variația în timp a forței de încărcare funcție de săgeată, la o grindă de lemn întărită

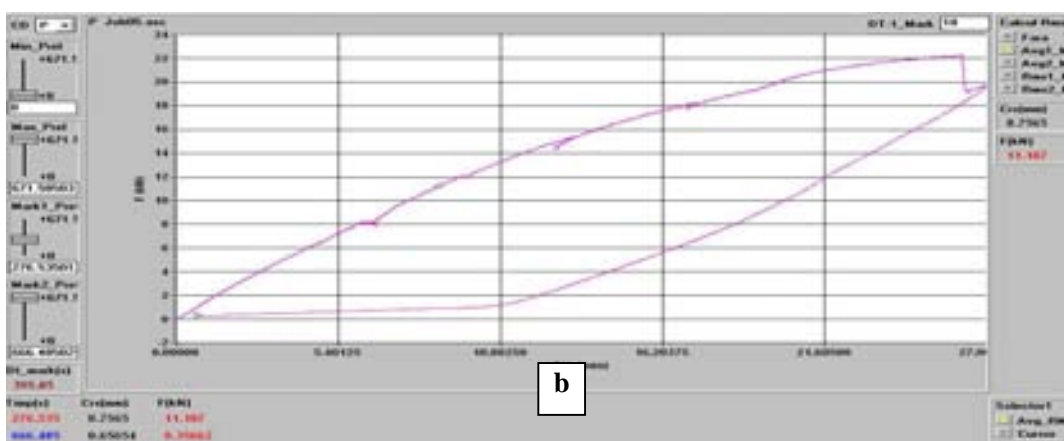


Fig. 8.34b. Variația în timp a forței de solicitare funcție de săgeată, la o grindă de lemn întărită

În Capitolul 9 am prezentat determinările experimentale ale rezistenței mecanice a lemnului consolidat cu materiale compozite sub formă de pânză din fibre de carbon. Astfel, în **Cazul 2** al acestui **capitol** se realizează studii experimentale de încovoiere pe grinzi din material de fag și, pentru ca investigația să conducă la rezultate relevante, am studiat mai multe soluții constructive. Am consolidat epruvete din lemn, debitate la diferite dimensiuni stabilite inițial, cu ajutorul unei rășini epoxidice (Epomax-PL) și cu pânză din fibre de carbon (Megawrap-200).

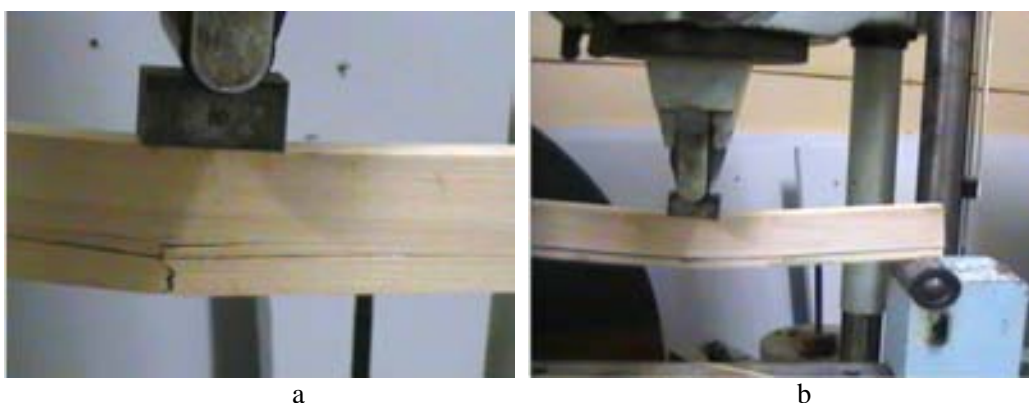


Fig. 9.1.5 Montajul experimental pentru cazul 2.

a-grindă de lemn de referință, b- grindă de lemn consolidată cu lamele și deformată după încercare.

Variantele de epruvete rezultate au fost încercate la încovoiere, pe mașina universală de încercări. Rezultate obținute le-am trecut în tabele și am realizat grafice cu dependențele funcționale ale mărimilor măsurate. Am constatat, după efectuarea tuturor experimentărilor, că varianta aceasta nu are aceleași rezultate remarcabile ca și prima variantă, în care dispozitivele au reușit să asigure realizarea unor tipuri de consolidări extrem de eficiente și fiabile.

În urma experimentărilor se pot evidenția următoarele concluzii importante care alcătuiesc cuprinsul Capitolului 10, și anume:

- lemnul este un material cu un anumit grad de neomogenitate, fapt ce face ca proprietățile sale mecanice să varieze într-o gamă prea largă; de aceea este cu atât mai necesară ameliorarea rezistenței cu ajutorul adaosurilor compozite;
- proprietățile lemnului depinzând de fibraj, care prezintă neomogenități, în experimente este necesar un număr mare de epruvete pentru a face o analiză statistică și a determina valorile sigure ale rezistenței și rigidității; este necesar să se lucreze cu epruvete foarte bune calitativ, fără eventuali concentratori de tensiune care să distorsioneze rezultatele încercărilor;
- lemnul de fag supus la încercările de încovoiere a dat rezultate mult mai bune decât cel de rășinoase; umiditatea relativă a lemnului de fag a fost în jur de 12 % ceea ce a îmbunătățit rezistența lui mecanică la

încovoiere atât consolidat cât și neconsolidat;

- întăririle cu material compozit sunt cu atât mai eficiente cu cât se află mai departe de axa neutră a secțiunii; variantele cu întăriri plasate la mijlocul secțiunii grinzii nu au crescut rezistența, în unele cazuri având chiar efect negativ;

- materialul compozit folosit trebuie să fie de calitate, formarea corectă a matricii fiind hotărâtoare; cazurile care au folosit pânză impregnată cu rășină direct pe probă nu au condus la creșterile scontate de rezistență din cauza compozitului de slabă calitate rezultat;

- folosirea compozitului de mare rigiditate (lamelele compozite), comparabil cu lemnul, nu conduce la rezultate foarte bune întrucât se produce relativ repede dezlipirea de lemn; în această situație se impune pretensionarea lamelei de compozit și solidarizarea mecanică a acesteia de grinda de lemn, lucru care se realizează cu ajutorul celor două dispozitive, concepute special pentru acest tip de încercări, dispozitive care ajută la obținere unor rezultate remarcabile în cazul epruvetelor din fag;

- materialul metalic folosit (profil INP 100) a fost supus la încărcări și descărcări succesive fără să se depășească domeniul elastic astfel încât încercarea să poată furniza date concludente; fenomenul s-a concretizat într-o curbă de histerezis.

În concluzie, în finalul Capitolului 10, se pun în evidență contribuțiile personale la studiul proprietăților mecanice și aplicațiilor unor materiale compozite, se specifică metodele de studiu ale acestor materiale de tip nou în industrie precum și partea experimentală care a stat la baza realizării acestor studii.

Deci, putem spune, ca o concluzie generală a tezei, că în comparație cu materialele curent folosite ca: beton, metale, mase plastice, ș.a., materialele compozite posedă proprietăți fizico-mecanice remarcabile. Determinarea experimentală a rezistenței la rupere a materialelor compozite a făcut obiectul numeroaselor studii, a căror rezultate au condus la dezvoltarea unei game variate de metode de testare, mai ales a structurilor compozite convenționale ranforsate cu fibre de carbon sau fibre de sticlă. Cunoașterea proceselor de inițiere și dezvoltare a deteriorărilor interioare cât și identificarea parametrilor care influențează aceste procese este necesară pentru dezvoltarea modelelor matematice folosite la evaluarea deteriorării. Aceste procese trebuie studiate în vederea determinării și proiectării structurilor rezistente la rupere cât și pentru dezvoltarea unor sisteme de materiale îmbunătățite.

În mod curent, lipirea cu ajutorul adezivilor sau rășinilor, constituie procedeul de bază folosit pentru cuplarea elementelor structurale. Calitatea procesului de lipire este influențată de o multitudine de factori care depind de natura materiei prime lemnoase (lemn sau alte fibre naturale), a rășinilor folosite, a procesului de lipire, cât și de condițiile în care produsele sunt utilizate.

În studiul experimental s-a urmărit cuantificarea obiectivă a îmbunătățirii rezistenței unei structuri mecanice fabricate dintr-un material ieftin (lemn) prin adăugarea de întărituri din material compozit. S-a ales cel mai întâlnit în practică element de construcție care este grinda solicitată la încovoiere cu forță concentrată. S-au analizat mai multe tipuri constructive și moduri de realizare a asamblării între cele două materiale (materialul de bază lemn sau metal și material compozit de întărire). S-au experimentat soluțiile de solidarizare: legătură mecanică la capetele grinzii, legături mecanice multiple, distribuite pe toată lungimea grinzii (pentru metal), legătură continuă, prin lipire. Parametrii aleși pentru a cuantifica rezistența grinzii au fost: săgeata, măsurată pentru o anumită forță de încărcare, forța maximă (la rupere) și săgeata maximă la rupere.

Prin măsurarea și înregistrarea variației în timp a forței de solicitare și a săgeții aferente (produsă de forță) s-a putut evidenția creșterea portanței fiecărei soluții în parte. Cheia evaluării este grinda de referință, față de aceasta măsurându-se îmbunătățirea calității de rezistență a grinzii.

O primă dificultate întâmpinată a fost neomogenitatea materialului de bază (lemnul), constatată prin variația destul de mare a rezistenței mecanice (de la o probă la alta). Acest aspect a obligat la folosirea unui număr mare de încercări pentru același material.

De asemenea, lemnul având o rezistență mecanică foarte mică, s-a căutat o cale suplimentară de creștere a portanței modelului experimental. De aceea s-a conceput un dispozitiv pentru aplicarea unei forțe de pretensionare a lamelei de compozit plasată în partea de jos a grinzii (în zona solicitată la întindere). S-au făcut încercări cu diverse forțe de pretensionare pentru găsirea unei combinații optime între rezistența lemnului și această forță. Constatându-se deficiențe de încărcare la dispozitivul mecanic de tipul I, proiectat și realizat, s-a înlocuit șurubul de aplicare a forței axiale cu un dispozitiv hidraulic special folosit în practică pentru reabilitarea grinzilor de beton armat, obținându-se dispozitivul de tipul II.

Rezultatele experimentale au fost îmbunătățite în mod remarcabil. S-a constatat că, dacă se crește forța de pretensionare pe măsura măririi solicitării (se compensează tasările), portanța grinzii crește cu valori proporțional mult mai mici; deci aceasta nu este o cale de îmbunătățire a portanței (creșterea pretensionării în exploatare); la forțe mici de pretensionare îmbunătățirea portanței este modestă ; o creștere majoră a pretensionării nu duce la o creștere prea mare a portanței; pretensionarea nu modifică, în general, comportarea elastică (în deformații) din cauza limitărilor ce apar în asamblările mecanice lemn-dispozitiv; numai dacă materialul este de calitate și pretensionarea este mare atunci portanța elastică crește semnificativ. ;

În cazul experimentărilor cu grinzi din lemn de calitate (fag), ranforsate cu lamele de compozit și pretensionate cu dispozitivul îmbunătățit, se pot trage concluziile :

- rezultatele au o rată de repetabilitate mult îmbunătățită, valorile experimentale având o mai mică împrăștiere ;

- portanța maximă a grinzilor din lemn de esență tare (fag), comparativ cu grinzile din lemn de esență moale de tipul rășinoaselor, este de aproximativ 4 ori mai mare;

Experimentarea grinzilor de oțel, în schimb, nu este foarte concludentă. Deși numărul de încercări este relativ mic, soluția de solidarizare a întăriturii s-a dovedit totuși viabilă, obținându-se unele creșteri de portanță și de rigiditate. Încărcările s-au făcut în domeniul elastic, existând posibilitatea efectuării de cicluri încărcare-descărcare repetate; s-a demonstrat astfel repetabilitatea rezultatelor. Ranforsarea grinzilor de metal are un potențial de îmbunătățire a portanței mai mic decât în cazul lemnului dar trebuie făcute cercetări suplimentare, considerând că se pot găsi soluții viabile de creștere, în special a rigidității.

Experimentările efectuate cu succes în teză conduc la o concluzie esențială și anume: metoda de creștere a rezistenței construcțiilor din lemn cu ajutorul materialelor compozite este viabilă și prezintă posibilități remarcabile pentru aplicarea ei în practică, așa cum defapt s-a și urmărit prin obiectivele tezei. Soluția este ușor de implementat iar costurile sunt mici deoarece dispozitivele utilizate pentru aplicarea acestei soluții nu necesită cheltuieli materiale și de manoperă importante, lucru care nu este deloc de neglijat.

Eficiența utilizării consolidărilor cu materiale compozite este deocamdată modestă. Se impune, astfel, continuarea și aprofundarea studiilor, experimentând noi metode și variante constructive pentru epruvetele supuse la încercări.

IANĂȘI AURORA CĂTĂLINA